

# Pinče a pinčové stěny

## Plazma ve Vesmíru

Uvádí se, že 99 % veškeré hmoty ve Vesmíru je v plazmovém skupenství. Jen my máme to štěstí, že žijeme na naší Zemi, která patří k onomu jednomu procentu hmoty ve skupenství jiném. Ale i na Zemi nalezneme plazma: v kanálech blesků, v ionosféře, v polárních zářích a v magnetosféře Země. Ve sluneční soustavě se plazma nachází ve slunečním větru, v magnetosférách planet a komet. V okolí Jupitera a Saturnu dokonce plazma vytváří obří plazmové torusy. Samo Slunce i ostatní hvězdy jsou velké plazmatické koule a takové jevy jako sluneční skvrny, spikule, chromosférické erupce a protuberance patří k typickým projevům plazmatu. Nejen hvězdy, ale i drtivá většina mlhovin v galaxiích je tvořena rozsáhlými oblaky plazmatu. V mlhovinách opět pozorujeme typické plazmové projevy: filamentaci způsobenou elektrickými a magnetickými poli, urychlování částic na značné energie a vyzářování způsobené různými mechanismy. V blízkosti centra Galaxie se pozorují rozsáhlá plazmová vlákna s délkou kolem 250 světelných let, kolmá na rovinu Galaxie.

## Petr Kulhánek

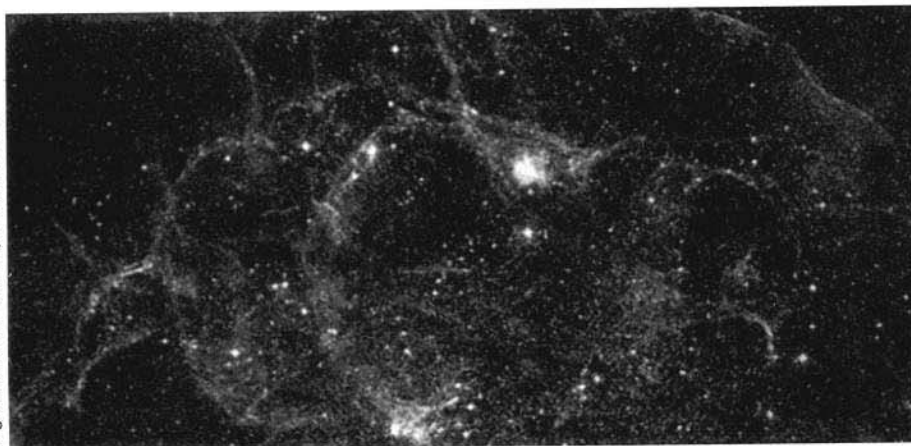
V ostatních galaxiích jsou podobné útvary sledovány zejména v jádrech aktivních galaxií (AGN - Active Galactic Nuclei). Blízké galaxie jsou propojeny vodíkovými plazmovými mosty (například naše Galaxie s Magellanovými mračny). Charakteristické jevy u kvasarů a některých aktivních jader galaxií jsou opět plazmové útvary a podvojná radiová struktura často pozorovaná u těchto objektů má svůj původ ve vlastnostech plazmatu. Numerické simulace posledních let ukazují, že plazmové jevy měly pravděpodobně dominantní úlohu při vytváření hvězd z protohvězdných oblaků a umožnily vytvoření počátečních globulí bez splnění Jeansova kritéria na minimální velikost mlhoviny i bez „startovací“ rázové vlny od blízké supernovy. Stejně tak numerické simulace ukazují, že spirální ramena galaxií mohou být důsledkem elektromagnetické interakce a globálních magnetických polí, nikoli jen gravitačním projevem. Dnes je také již jisté, že ty nejenergetičtější přirozené částice, které pozorujeme v kosmickém záření, byly urychleny ve vesmírných plazmových vláknech s elektrickými dvojvrstvami. Celkový obraz naše-

ho Vesmíru se tak mění. Vesmír, to není jen gravitační interakce, jak jsme si donedávna mysleli. K utváření Vesmíru přispívá stejnou měrou elektromagnetická interakce a její projevy. S nástupem rentgenovských družic posledních let jsme se dočkali doslova útoku fyziky plazmatu na náš Vesmír.

Co to tedy vlastně plazma je? Učená definice říká: „Plazma je kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči nábojů, který vykazuje kolektivní chování“. Pojďme si ji trochu polidštit. To nejdůležitější je, že se v plazmatu nachází *volné nosiče náboje*. Atomy jsou alespoň částečně ionizované. Stupeň ionizace nemusí být příliš veliký, je-li plazmový útvar dosti rozsáhlý. Právě volné nosiče náboje plazma zcela odlišují od plynů. Plazma je vodivé a silně reaguje na elektrická a magnetická pole. Druhá vlastnost je *kvazineutralita*. Požadujeme, aby v makroskopických objemech bylo vždy v průměru stejné množství kladných a záporných částic. Navenek se plazma jeví jako nenabitá tekutina (kapalina či plyn). Požadavek kvazineutrality vyčleňuje z definice plazmatu nabitě svazky částic, které mají přece jen poněkud odlišné vlastnosti. Poslední součástí definice plazmatu je jeho *kolektivní chování*. Tím se rozumí, že plazma je schopné jako celek svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na takováto globální pole reagovat.

Jaké jsou základní projevy plazmatu? Plazma má tendenci vytvářet lineární a plošné útvary - plazmová vlákna neboli pinče a proudové vrstvy neboli *pinčové stěny*. V plazmatu dochází k takzvaným *driftům* - pohybum částic kolmo na magnetická i další silová pole. Plazmatem se může šířit ohromné množství nejrůznějších vln - od magnetoakustických vln, ke kterým patří například známé Alfvénovy vlny, které jsou analogií zvukových vln v plynech, až po elektromagnetické vlny mnoha různých módů. Tyto vlny jsou v plazmatu také snadno generovány. V plazmatu dochází k celé řadě *nestabilit*, které mají za následek například krátkodobé vyzářování značného množství energie dopro-

Anglo Australian Telescope Board, 1996.



Vláknité struktury v pozůstatku po explozi supernovy v Plachtách.  
Fotografie Davida Maliny - UK Schmidt Telescope.

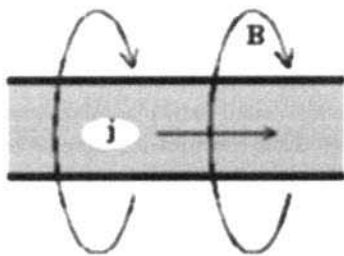
### Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (\*1959)

Vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře fyziky FEL ČVUT. Poslední dva roky, kromě standardních přednášek, vede výběrovou přednášku „Astrofyzika“ doplněnou astronomickým soustředěním.

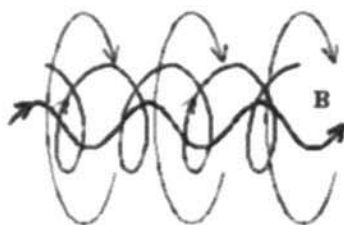
vážen vznikem některých charakteristických struktur. K plazmatu neodmyslitelně patří *vyzařování* (rekombinační, brzdné a synchrotronní), vytváření *elektrických dvojvrstev*, *urychlování nabitých částic* na značné energie, *magnetohydrodynamické dynamo* produkující magnetické pole uvnitř Slunce a planet a mnoho dalších zajímavých jevů. Z celého bohatství plazmových jevů bych dnes věnoval tento prostor proudovým vláknům neboli pinčům.

### Pinč

Pinče neboli proudová vlákna patří snad k nejběžnějším útvarům v plazmatu. V nejjednodušší situaci proud teče v ose pinče (axiální směr) a kolem pinče vytváří magnetické pole (azimutální směr). Toto pole působí Lorentzovou silou na proudové vlákno a snaží se ho smrštít. Po čase se ustaví rovnováha mezi gradientem tlaku plazmatu, který se snaží plyn rozepnout, a Lorentzovou silou, která pinč komprimuje. Tato rovnováha je nestabilní a pinč tohoto typu se rychle rozpadá. Stačí však, aby magnetické silokřivky byly zkroucené do magnetického provazce a pinč se stává relativně stabilním útvarem. Proudová hustota i magnetické pole mají axiální i azimutální složky. Axiální složka prou-



Obyčejný pinč - axiální proud, azimutální pole.



Helicimní pinč - pole i proud tvoří spirálu.

du generuje azimutální pole a azimutální složka proudu generuje axiální pole. V tomto případě hovoříme o tzv. *helicitním (spirálovitém) pinči*. Má-li pinč dostatek času, deformuje se do spirálovité struktury, často jsou dokonce pozorovány vzájemně propletené *dvojspirály*. To je způsobeno tím, že dva spirálovité pinče se shodně orientovaným proudem se na velkých vzdálenostech přitahují (tak jako každé dva rovnoběžné vodiče protékané souhlasnými proudy). Na malých vzdálenostech dochází ale k repulzi způsobené azimutální složkou proudu. Tím je možné vytvářet energeticky vázané dvojice - dvojspirály. V laboratořích je významná ještě jedna konfigurace: *toroidální pinč* - plazma držené v toroidální geometrii v *tokamacích*. Jde vlastně o stočený pinč do tvaru automobilové pneumatiky. Místo axiálního pole zde bývá zvykem hovořit o poli toroidálním a místo azimutálního pole o poli poloidálním.

Kromě neznámější válcové struktury se pinče mohou také formovat jako proudové vrstvy či *pinčové stěny* držené vlastním magnetickým polem. Tyto útvary známe i z pozemských pozorování, například v aurorální oblasti se vyskytují vertikální pinčové stěny lokalizované cca na 70° jižní i severní světové šířky, tloušťka stěny je několik desítek kilometrů, lineární rozměry tisíce kilometrů. Stěna je orientována podél silokřivek zemského magnetického pole, které odpovídá axiální komponentě v cylindrickém pinči. Ve vrstvě probíhá výboj s proudovou hustotou  $\sim 30 \mu\text{A}/\text{m}^2$  generující vlastní magnetické pole se známými doprovodnými efekty jako jsou polární záře. Toto vlastní pole přebírá úlohu azimutálního pole u normálního pinče. První podrobnější průzkum pinčových stěn na Zemi provedla sonda TRIAD v roce 1976, první detekce pochází ale již z roku 1966 (navigační satelit 1963-38C). Polární záře jsou dnes dobře prozkoumányými plazmovými efekty nejen na naší Zemi. Na obrázku je fotografie polární záře na Saturnu z počátku roku 1998.

### Bezilová konfigurace

U pinčů s dlouhou dobou života se díky disipaci energie struktura pinče přemění do tzv. *bezilové konfigurace*. Jde o konfiguraci s nejnižší možnou energií. Proud je veden podél spirálovitě stočených, magnetických silokřivek. Tyto podélné proudy nazýváme *Birkelandovy proudy*. Hustota



Polární záře Saturnu. Důsledek Birkelandových proudů tekoucích v pinčové stěně v aurorální oblasti. HST, kamera STIS, 7. ledna 1998.

Lorentzovy síly  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  generovaná Birkelandovými proudy je nulová. Proto se tato konfigurace magnetických polí a proudů nazývá *bezilová (force free) konfigurace*. Pinč s Birkelandovými proudy je nutně *helicitní*. Kde všude můžeme Birkelandovy proudy detekovat?

- *Polární záře*. Právě v polárních zářích tekou elektrické proudy zejména ve směru silokřivek magnetického pole Země. Často jsou pozorovány podélné filamenty délky asi 100 m.

- *Ionosféra Venuše*. V ionosféře Venuše byla detekována proudová vlákna s Birkelandovými proudy o délce až 20 km.

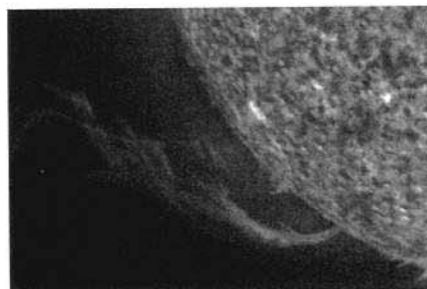
- *Jupiter - Io*. Z plazmového hlediska jde o velmi zajímavou soustavu. Měsíc Io svou sopečnou činností vyvrhuje plazma bohaté na síru, které podél celé jeho trajektorie vytváří rozsáhlý plazmový torus. Podél silokřivek magnetického pole planety Jupiter (kolmo na torus) tekou Birkelandovy proudy, které se uzavírají přes Měsíc Io a částečně ho zahřívají. Velikost těchto Birkelandových proudů se odhaduje na několik megaampérů.

- *Komety*. V kometárních ohonech jsou často detekovány dlouhodobě se vyskytující vláknité struktury. Po objevu magnetických polí v kometárních ohonech je zřejmé, že jde opět o pinče s Birkelandovými proudy.

- *Slunce*. Na Slunci najdeme celou řadu příkladů vláknitých helicitních struktur s Birkelandovými proudy tekoucími podél silokřivek lokálních magnetických polí: protuberance ( $10^{11}$  A), spikule, koronální proudy, erupce a další.



Kometa Hjakutake z roku 1996. Obon má charakteristickou filamentární strukturu.



Sluneční protuberance ovládaná magnetickým polem. Patrná jsou Birkelandova proudová vlákna.

– *Mlhoviny.* V mnoha mlhovinách pozorujeme helicitní vláknité struktury. Zde nemáme přímá pozorování, která by potvrdila, že jde o filameny s Birkelandovými proudy, ale existují nepřímé indicie: pozorování polarizovaného synchrotronního záření, které vzniká jedině v oblastech s magnetickými poli a detekce projevů vysoce energetických částic, které mohou být urychlovány právě v pinčové struktuře.

– *Centrum Galaxie.* V centru Galaxie je sledováno několik filamentů o délce asi 60 pc, které připomínají pokroucená lana a mají tedy helicitní strukturu. Pravděpodobně jde také o plazmové útvary udržované magnetickým polem. Odhad velikosti polí a proudů je založen jen na nejisté rozměrové extrapolaci.

– *Radiové galaxie, AGN, jety quasarů.* V okolí těchto objektů jsou detekovány rozsáhlé vláknité struktury, pravděpodobně vytvářené elektromagnetickou interakcí.

### Diocotronová nestabilita

Jestliže v pinči dojde z jakýchkoli důvodů k separaci elektrického náboje v radiálním směru, vzniká nenulové radiální elektrické pole, které spolu s axiálním magnetickým polem  $B_z$  způsobuje azimutální drift rychlostí  $v_{\phi}$ . Celý pinč začne rotovat diferenciální rotací (oblasti různě

vzdálené od osy rotují různou rychlostí). Na povrchu pinče se střikají dvě oblasti s různou rychlostí (rotující pinč a okolní prostředí) a může dojít k rozvoji nestability analogické klasické Kelvin-Helmholtzově nestabilitě známé z proudění tekutin. Tuto nestabilitu nazýváme diocotronová nestabilita. Typickým způsobem modifikuje povrch pinče do vírových struktur.

K separaci náboje v radiálním směru, která je základní podmínkou vzniku diocotronové nestability, může dojít mnoha způsoby. Nejčastěji jde o různé drifty, na které reagují elektrony jinak než ionty. Vlastní záření pinče také může způsobit separaci náboje. Zářivé procesy odnášejí část tepelné energie uvolněné při výboji, tím vzniká radiální gradient teploty, který způsobí nejen separaci elektrického náboje (analogie termoelektrického jevu), ale i separaci jednotlivých chemických elementů. Vznik nekompensovaného náboje mohou také způsobit různé typy nestabilit.

Diocotronová nestabilita je pro pinče velice častá. Je pozorována v mnoha laboratorních experimentech, ve vesmírném plazmatu a v numerických simulacích. Dokonce povrchy spirálních ramen některých galaxií vykazují obrazce typické pro diocotronovou nestabilitu. Její charakteristické obrazce nalezneme i v proudových vrstvách – záclonovité útvary v polárních zářích nejsou nic jiného než rozvinutá diocotronová nestabilita.

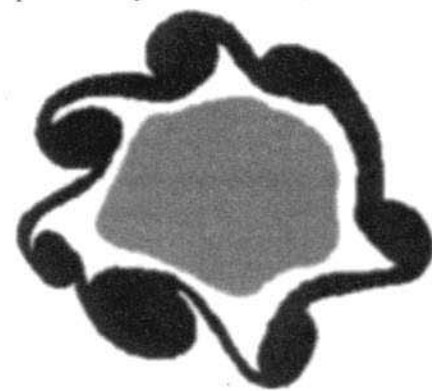
Rozvoj diocotronové nestability podmíněný povrchovou rotací pinče může být dominantním impulsem k přestavbě pinče do

helicitní struktury a oba procesy spolu úzce souvisejí, snad mohou probíhat i současně.

### Plazmafokus

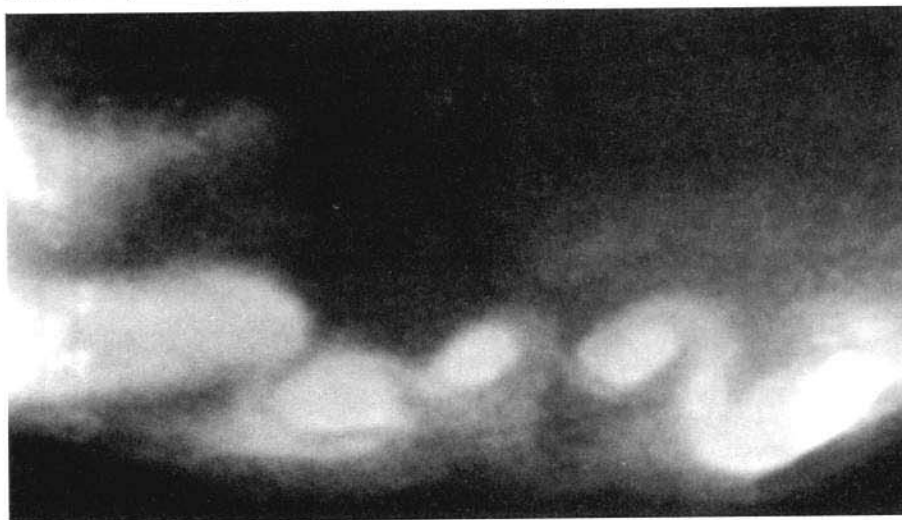
Plazmafokus je bezesporu nejslavnější z laboratorních plazmových zařízení. Bylo zkonstruováno poprvé koncem 50. let. Tehdy nikdo netušil, že příroda nám to samé zařízení přichystala na měsíci Io planety Jupiter ...

Jde o koaxiální urychlovač plazmatu – mezi dvěma válcovými elektrodami je urychlováno plazma vlastním magnetickým polem. Po opuštění elektrod vytváří plazma



Průřez pinčem s rozvinutou diocotronovou nestabilitou.

charakteristickou deštníkovitou strukturu, kterou stále teče proud. Tento proud generuje magnetické pole, které stlačuje plazma "rukojeti" do velmi hustého lineárního útvaru, tzv. plazmafokusu. Plazmafokus není nic jiného než velmi hustý pinč. V plazmafokusu byly uskutečněny první pokusy o termojadernou syntézu a dnes se spolu s moderními laserovými technologiemi k tomuto principu



Polární záře pozorovaná nad Aljaškou 31.1.1973





opět vracíme. V letošním roce bylo pokusů o uskutečnění termojaderné fúze provedeno více v pinčových aparaturách než v klasických tokamacích.

Téměř ihned poté, co sondy Voyager 1 a Voyager 2 vyfotografovaly činné vulkány na měsíci Io, navrhl Gold (1979), že by sopečné plyny mohly být ionizovány a v jícnu sopky probíhat elektrický výboj, který je analogický výboji v koaxiálním urychlovači. Dnes již máme konkrétní údaje. Magnetické pole Jupitera v oblasti měsíce Io má hodnotu 1900 nT. Indukované elektromotorické napětí způsobené pohybem měsíce napříč silokřivkou je 400 kV a detekovaný Birkelandův proud cca 1 MA. Uvolňovaný výkon tedy je  $-0.4$  TW! Je-li tento výkon rozdělen mezi několik největších vulkánů, pořád ještě zcela postačuje k udržování plazmového výboje a vytvoření plazmafokusu. Porovnejte fotografii vulkánu s tvarem proudové vrstvy laboratorního plazmafokusu.

### Elektromagnetický kolaps

Pinče představují v elektromagnetické interakci podobné útvary jako hvězdy pro interakci gravitační. U hvězd je gradient tlaku látky a záření udržován gravitačním polem, u pinčů magnetickým polem. Pokusme se nyní porovnat základní rozdíly obou rovnovážných konfigurací: pinče v elektromagnetické a hvězdy v gravitační interakci.

– Gravitačně vázané objekty mají sférickou symetrii; elektromagneticky vázané objekty mají válcovou symetrii nebo plošnou symetrii.

– Gravitačně vázaný objekt nepotřebuje interakci s okolním světem; pinčem musí protékat proud, který je v laboratoři vytvářen vnějším obvodem a ve Vesmíru vnějšími poli.

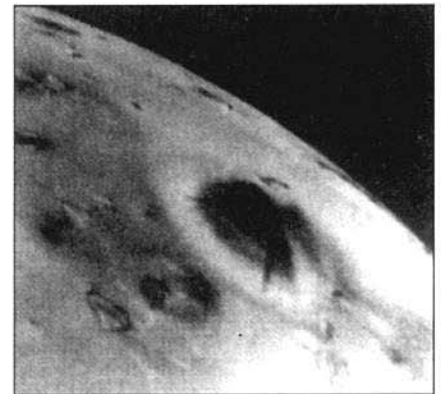
– Obě konfigurace mohou mít značné rozdílné rozměry. To je dáno rozdílnou velikostí elektromagnetické a gravitační interakce. Například poměr elektrostatické a gravitační síly pro dva protony je  $F_e/F_g = 10^{36}$ . Díky tomuto faktu můžeme v laboratorních podmínkách vytvářet i pinče malých

rozměrů (milimetry, centimetry), ve kterých sledujeme látku s parametry odpovídajícími nitru hvězd!

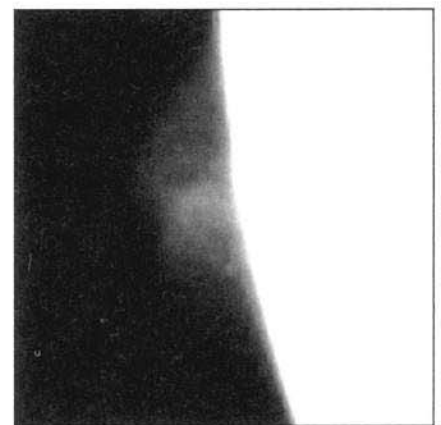
• Rovnovážná konfigurace hvězdy je stabilní; rovnovážná konfigurace pinče vykazuje celou řadu nestabilit: například v místě náhodného zúžení pinče se vytvoří silnější magnetické pole (menší poloměr) a vyšší magnetický tlak pinče dále zaškrcuje až dojde k jeho přetržení, případně rozpadu na několik částí - korálků (koráلكová nestabilita). V místě náhodného ohybu pinče vzniká silnější pole a tlak na vnitřní straně a proto se počáteční prohnutí bude zvětšovat. Obecně platí, že helicitní pinče jsou výrazně stabilnější útvary než pinče nehelicitní.

R. S. Pease a S. Braginskij odvodili nezávisle na sobě již v roce 1957 teoretickou možnost elektromagnetického kolapsu pinče. Průchodem proudy pinčem je ohmicky uvolňována tepelná energie zahřívající pinč. Tato energie je odnášena ven zářením (rekombinačním, brzdovým a synchrotronním). Při vysokých hodnotách proudy je odnášeno zářením takové množství energie, že dojde k porušení rovnováhy pinče, vnější magnetický tlak převáží tlak látky a plazmové vlákno začíná kolabovat k centru. Přitom se jeho teplota nezvyšuje, naopak může i poklesnout díky prudkému odvodu energie zářením. Tento kolaps může zastavit až tlak degenerovaného plynu elektronů nebo neutronů (kvantové jevy v superhusté látce). Scénář elektromagnetického kolapsu velmi připomíná závěrečná stádia vývoje hvězd - gravitační kolaps na bílého trpaslíka či neutronovou hvězdu (včetně závěrečného ochlazení). K elektromagnetickému kolapsu by mělo dojít pro proudy větší, než je hodnota  $I_{PB} = 1.6$  MA odvozená Peasem a Braginskim pro brzdový mechanismus vyzářování. Základním problémem je, že před dosažením Pease-Braginského proudy se pinč zpravidla rozštěpí na několik pinčů. Těmi ovšem již teče podkritický proud. U vysoce energetických pinčů navíc převládá synchro-

tronní záření, pro které Pease-Braginského výpočet neplatí. Možnost elektromagnetického kolapsu tak i dnes zůstává otevřená. V současných největších pozemských aparaturách (zařízení Saturn – Sandia Labs, USA) je hodnota Pease-Braginského proudy překročena a superhusté stavy hmoty zde dosahované se elektromagnetickému kolapsu značně přibližují.



Soptící vulkán Prometheus na měsíci Io. Voyager 2, 1979.



Boční snímek vulkánu Prometheus ze sondy Galileo, 28.6.1997. Plazmafokus ve Vesmíru.